

新型太陽電池性能評価技術の 開発

太陽光発電研究センター

評価・標準チーム

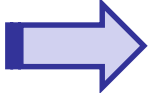
吉田正裕

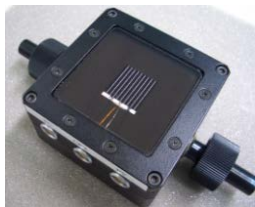
Outline:

- 評価・標準チームの概要
- 新型太陽電池性能評価技術の開発
～高精度性能評価に向けた取り組み～
 - ・ペロブスカイト太陽電池
 - ・高効率結晶Si太陽電池(セル・モジュール)
 - ・その他の高精度測定に向けた技術開発
 - 照度調整への基準セルの反射の影響
 - LBIC測定による有効発電領域評価
- 本発表のまとめ

評価・標準チーム

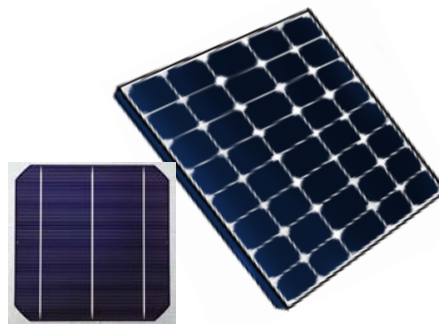
- ◆ 基準太陽電池校正技術の開発と高度化
- ◆ 新型太陽電池の発電性能評価技術の開発
- ◆ 屋外高精度性能評価技術の開発


 太陽電池発電性能評価に関するこれら**共通基盤技術**の**開発**、及び、その**標準化**を推進し、太陽電池の高効率化・低コスト化、また、太陽光発電システムの普及に貢献する。



基準太陽電池

校正技術開発と高度化



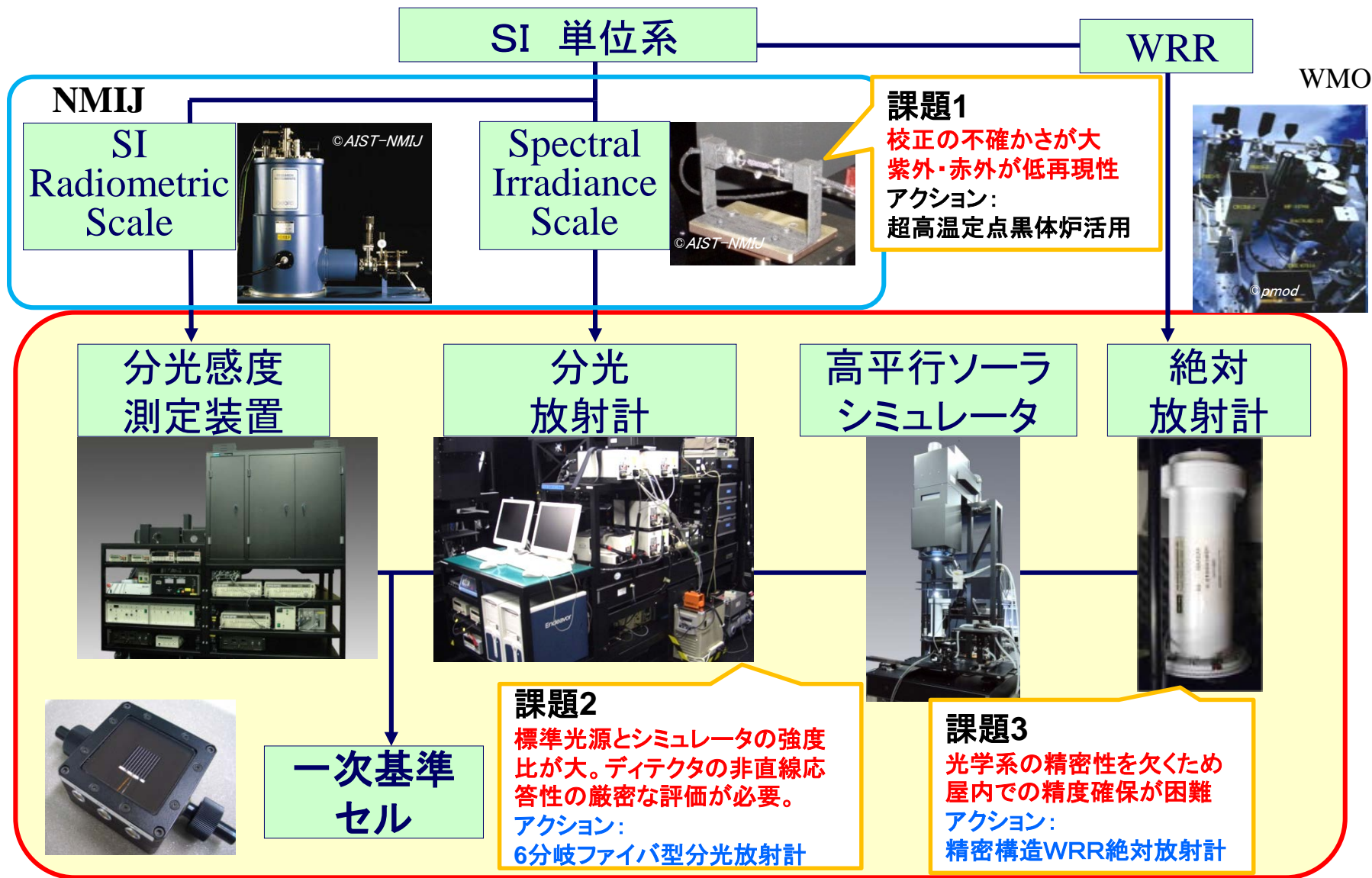
新型高効率太陽電池

高精度発電性能評価技術の開発



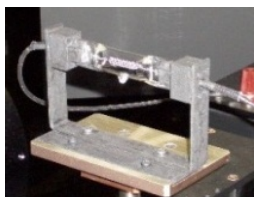
屋外設置モジュール・ストリング

校正の不確かさを改善する上でのトレーサビリティにおける技術課題

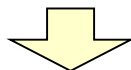


課題1: 超高温定点黒体炉導入による分光放射照度標準の再現性の向上

分光放射標準電球



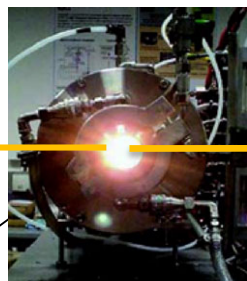
超高温定点黒体炉 : 金属炭化物-炭素(WC-C)の包晶点を用いて約3000 Kの超高温で定点を実現できる黒体炉



相対分光分布の再現性が高い

入射光学系

放射温度計

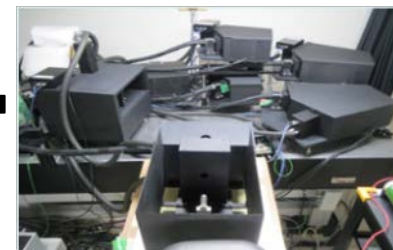


超高温定点黒体炉

積分球

光ファイバ

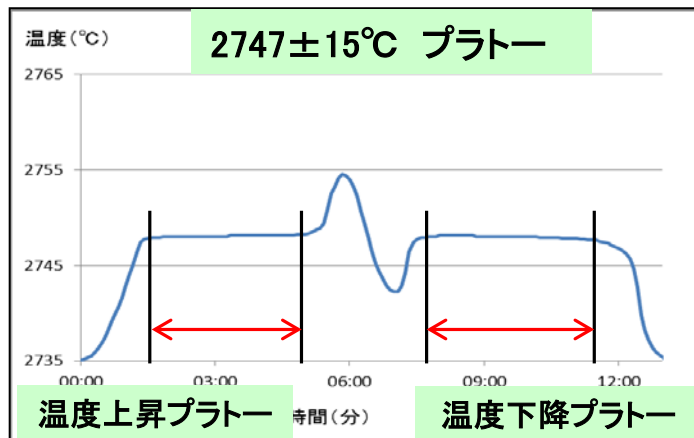
分光放射計



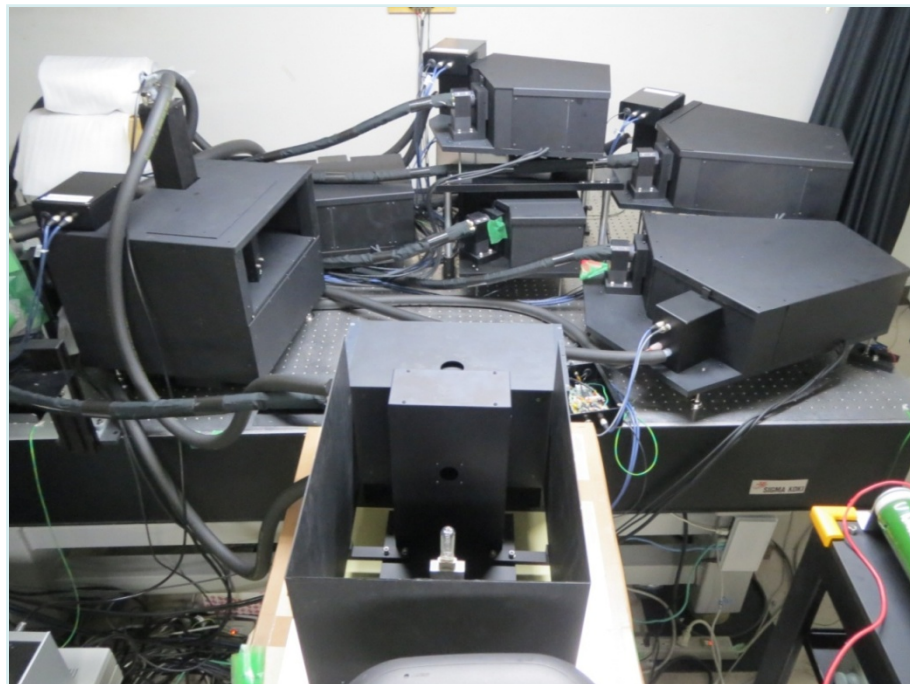
超高温定点黒体炉



温度定点るつぼ



課題2:
黒体炉対応6分岐ファイバー型分光放射計の開発:分光器6台同時駆動



- **波長分解能の向上**
- **分光放射スペクトルの高速測定**
- **対光非直線応答を精密評価**

課題3:
構造精緻型絶対放射計の開発と性能検証

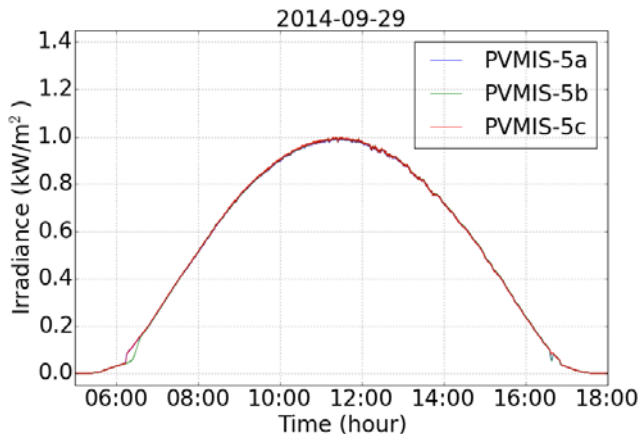


精密構造WRR絶対放射計

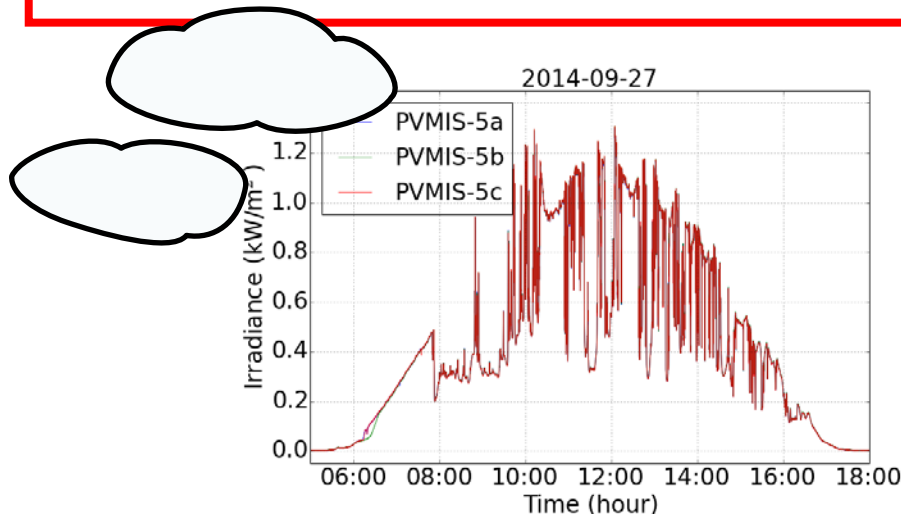
国際直達日射比較 (IPC)に参加し、
 性能検証とWRRファクターの評価

* WRR : World Radiometric Reference
 (世界放射計測標準)

従来: 快晴日のみ



本研究: 日射変動日の高精度測定



原理的には高精度測定可能
(⇔ 高度な装置、技術が必要)

- 測定機会少 (~4-49days/year in Japan)
- スペクトル、角度依存等による誤差の恐れ

・ 測定機会多 (~160-250 days/year in Japan)

従来技術では測定誤差大であった
→ 新技術開発により、高精度化が可能



☀️ 屋外高精度性能評価技術を開発、検証

・高速IV特性測定 + PVMSによる同期日射測定

PVモジュール日射センサ

PVMS: PV Module Irradiance Sensor



I-V curve



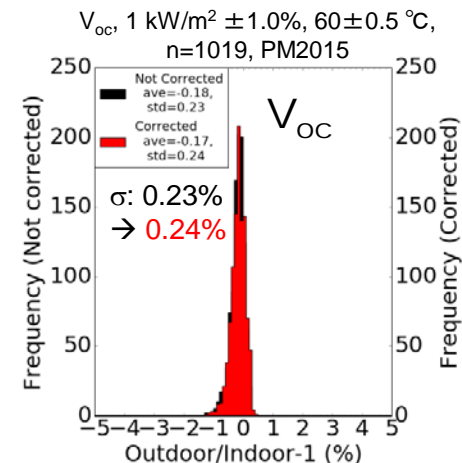
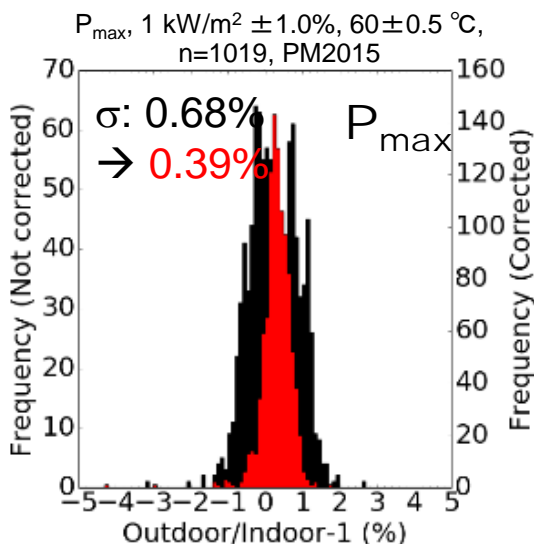
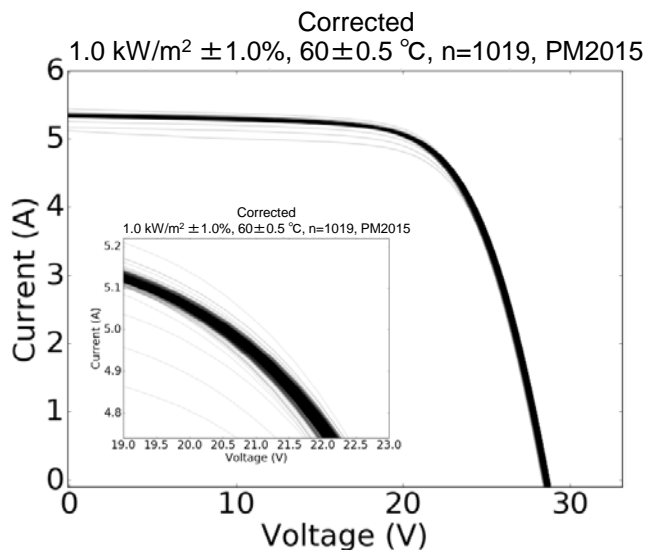
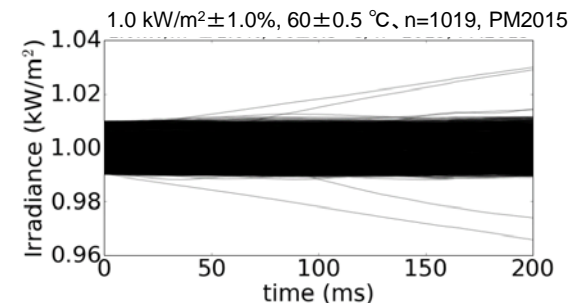
logger

irradiance

(synchronize)

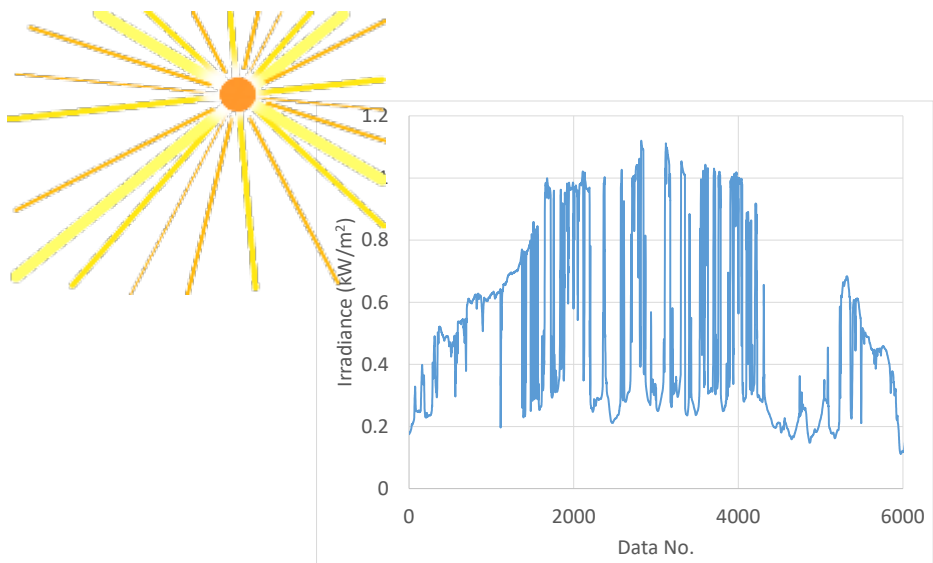
Sweep time: 0.2 s

I-V, PVMS: **synchronized**

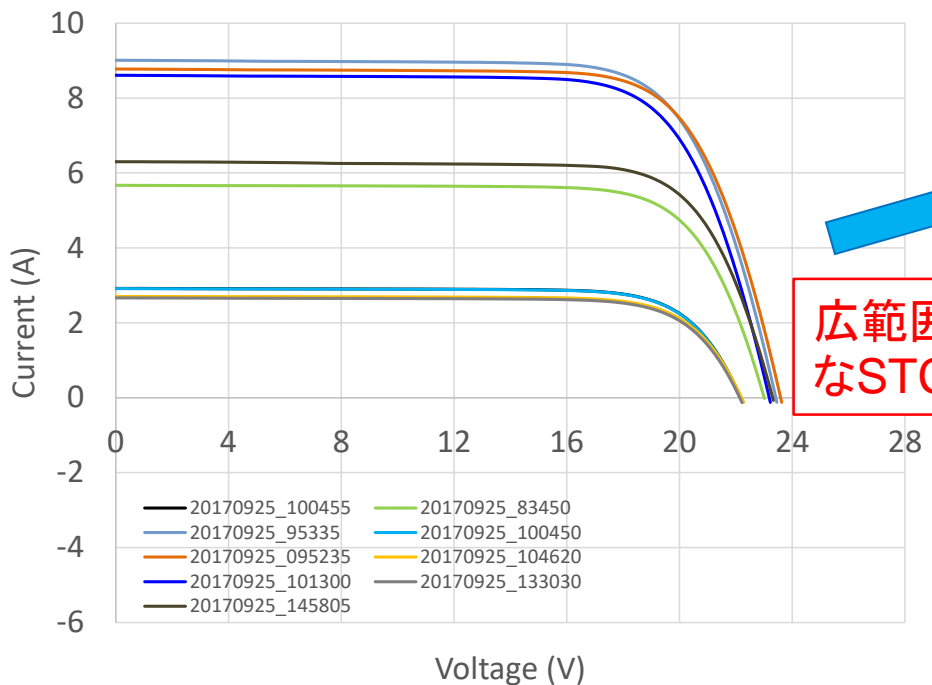


± 1% (σ) 以内の高速高精度測定が可能に。

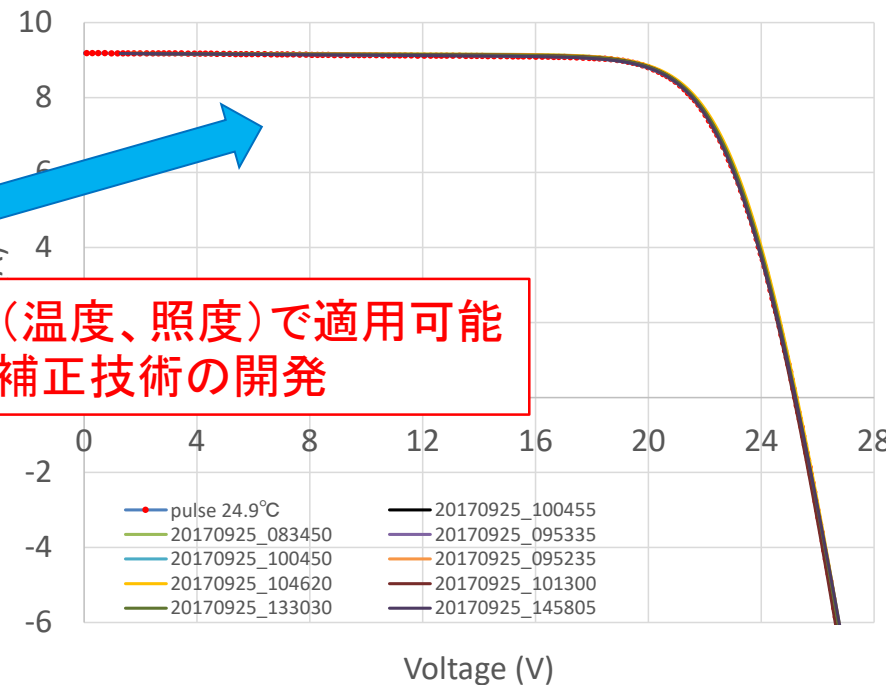
- ・高精度化、再現性を検証すると共に、測定手法明確化へ
- ・低照度領域やストリング測定への適用も見据えて研究開発を実施中



- 日射変動が顕著な気象でも、快晴日と同等の高精度IV測定 (再現性 $\leq \pm 1\%$)、STC補正が可能な技術を開発した(結晶シリコンモジュール、ストリング)。
- 現在のIEC, JIS等の補正式よりも簡便かつ高精度



広範囲(温度、照度)で適用可能なSTC補正技術の開発

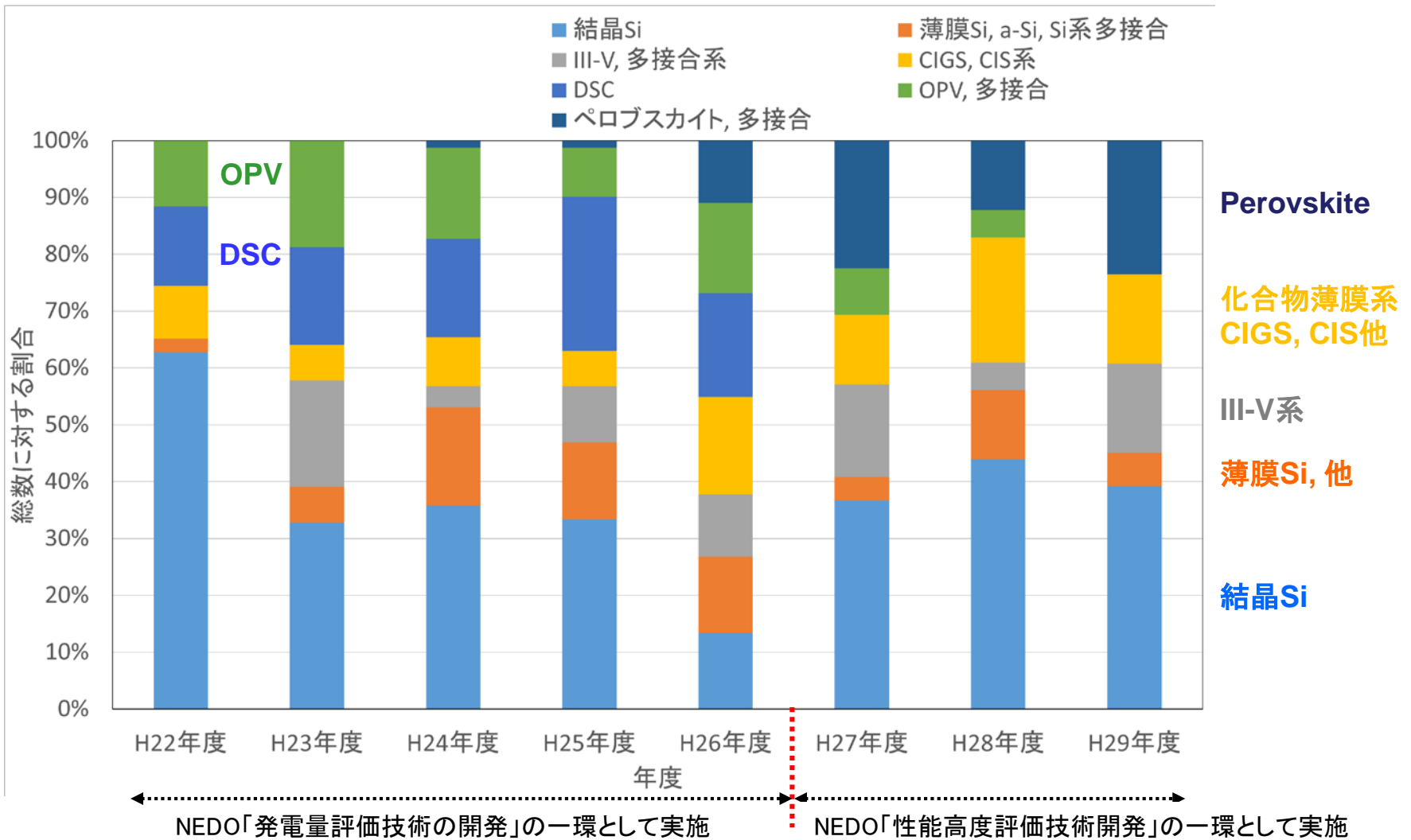


各種新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

◆ 太陽電池の**特徴・特性**に応じた性能評価技術の開発

新型太陽電池(代表例)	特徴・特性	性能評価法開発(実施中)
高効率結晶Si太陽電池 ・PERC ・ヘテロ接合 ・バックコンタクト	・高容量性 → I-Vヒステリシス ・高量子効率 (構造的特長) ・特殊バスバー形状 ・特殊裏面電極構造	・I-V測定掃引速度の最適化 ・分光感度(+反射・透過)の高精度測定 ・多数バスバー対応 ・プローブバー影の影響の検討 ・専用測定ジグの使用
・両面受光型	・両面発電(Bi-faciality)	・表面・裏面照度応答性 ・線形性検証 ・裏面入射光の影響
CIGS化合物系 薄膜系	・光照射効果 ・過渡応答(高速、低速)	・I-V測定掃引速度の最適化 ・ V_{pm} ホールド法の併用
ペロブスカイト 色素増感	・遅い応答時間, I-Vヒステリシス ・不安定性 -- 短/長期安定性 -- 不可逆変化	・低速掃引I-V測定(数秒~数百秒) ・(Quasi-) steady state測定 -- V_{pm} ホールド法/MPPT法/etc.

AISTにおける年度別新型太陽電池測定数(割合ベース)

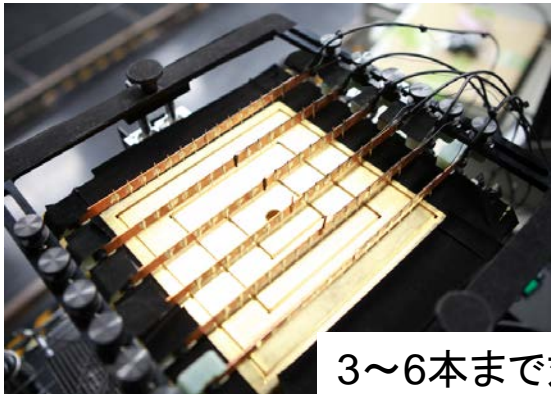


* 弊チームにおける性能評価法に関する研究・開発の一環としてデバイス種類・数を選別した上で実施した測定数です。
 そのため、太陽電池業界の研究開発動向を直接を反映しているわけではなく、あくまで参考としてご覧ください。

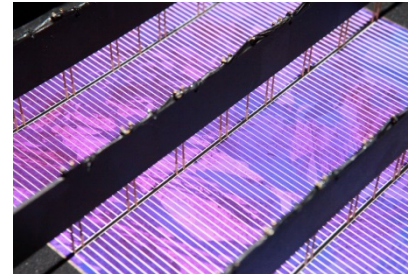
新型高効率結晶Si太陽電池の性能評価技術

◆結晶Si太陽電池ベアセル

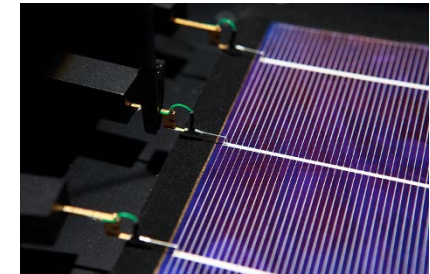
1. 多数バスバー構造への対応 2. プローブバーの影による照度 (I_{sc}) への影響



3~6本まで対応可能



(a) 影あり測定



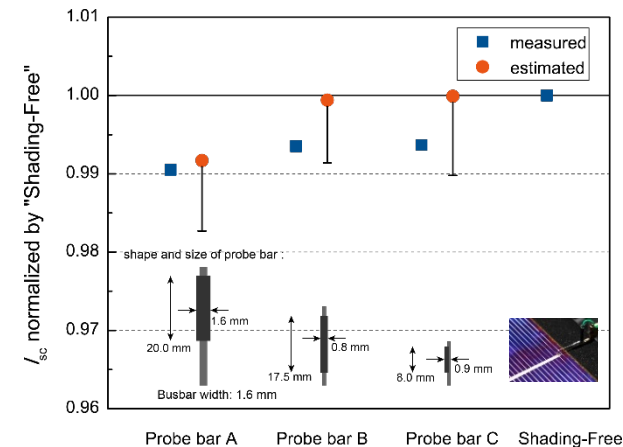
(b) 影なし測定

プローブバー影の影響を計算と実験とで比較考察

3. 探針レスプローブバーの検討
4. 高効率セル/Hヒステリシスへの対応

◆結晶Si太陽電池モジュール

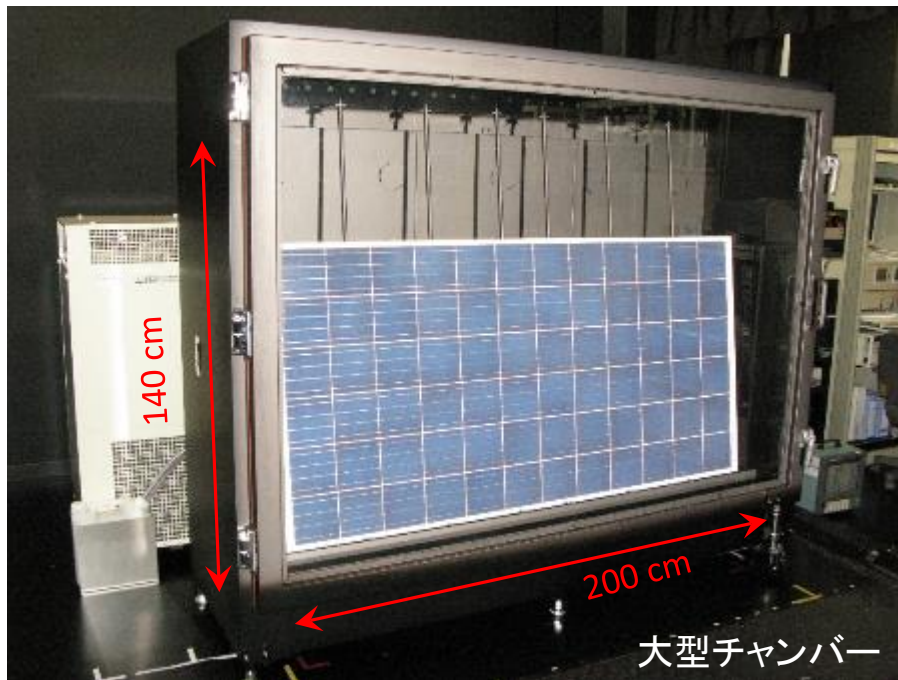
5. 大型・高出力モジュールへの対応
- 高出力 (> 420 W) 対応装置導入
 - 大型モジュール (幅 < 2 m) 温度特性評価



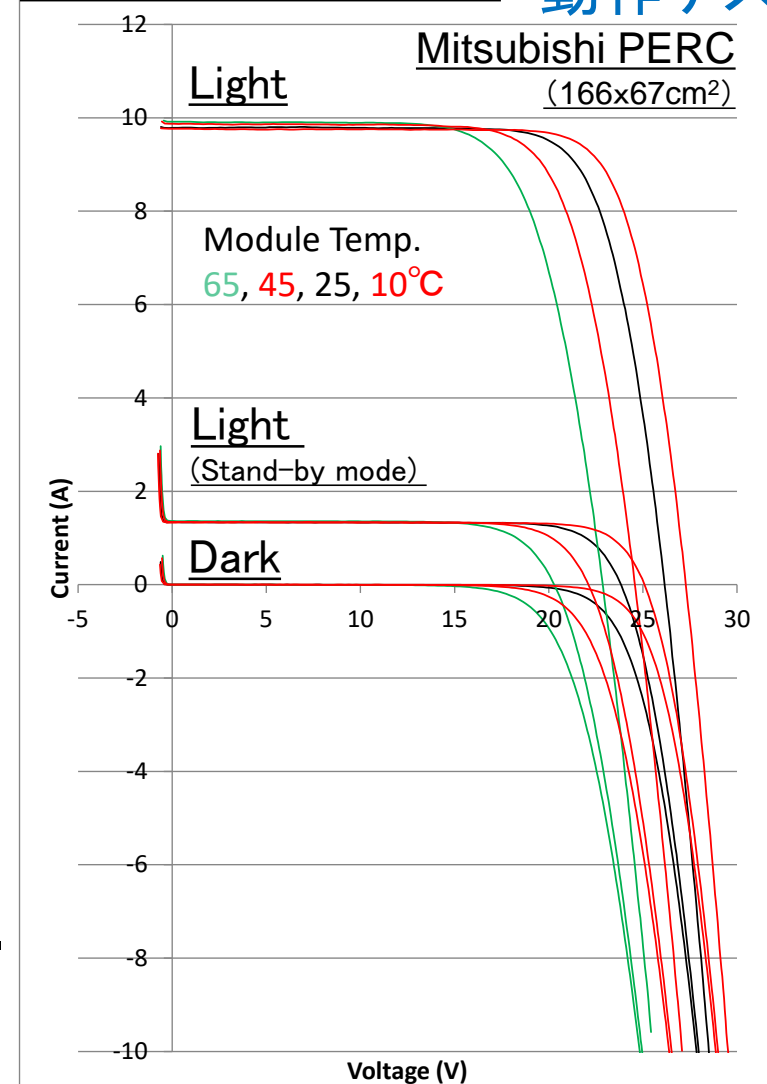
H. Shimura *et al.*, PVSEC-27 (Otsu, 2017).

志村他: 成果報告会ポスター No. 82

太陽電池大型・高出力モジュール対応・温度特性評価に関して



IV温度特性(ミスマッチ未補正) 動作テスト



- ~ 2-m大型モジュールに対応
- 温度均一性
冷却時: $15 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 以内、加熱時: $65 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 以内

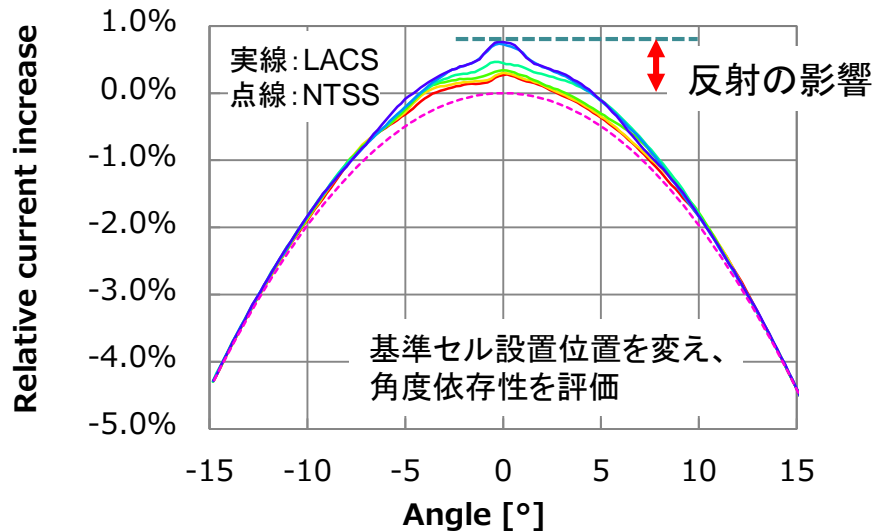
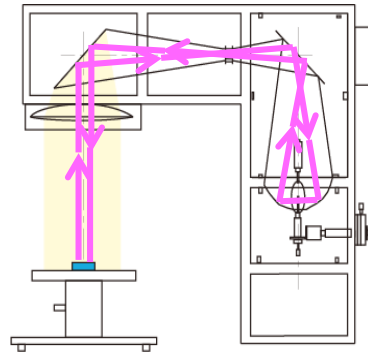
⇒今後の計画:

- 新型モジュール(大型含む)の温度特性測定・温度係数の評価
- 両面受光型モジュール性能評価

高精度測定に向けた技術開発への取り組み

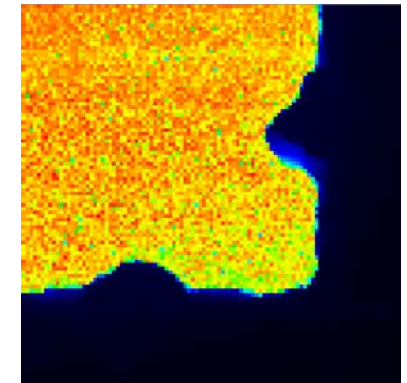
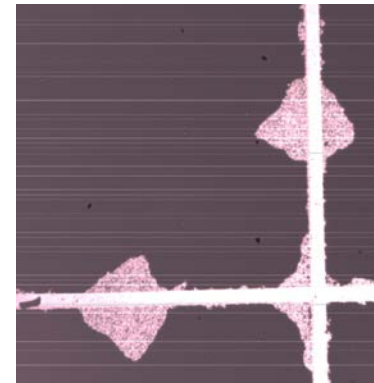
基準セルの反射の影響の評価

測定照度への基準セル表面反射の影響を高精度に定量評価



LBIC (Laser-Beam Induced Current) 測定による有効発電面積の評価

← 800 μm →



(a) 光学顕微鏡像

(b) LBIC像 ($\lambda_{LD} = 635.7 \text{ nm}$)
測定間隔 8 μm

CIGSセルのスクライブ領域のLBIC像

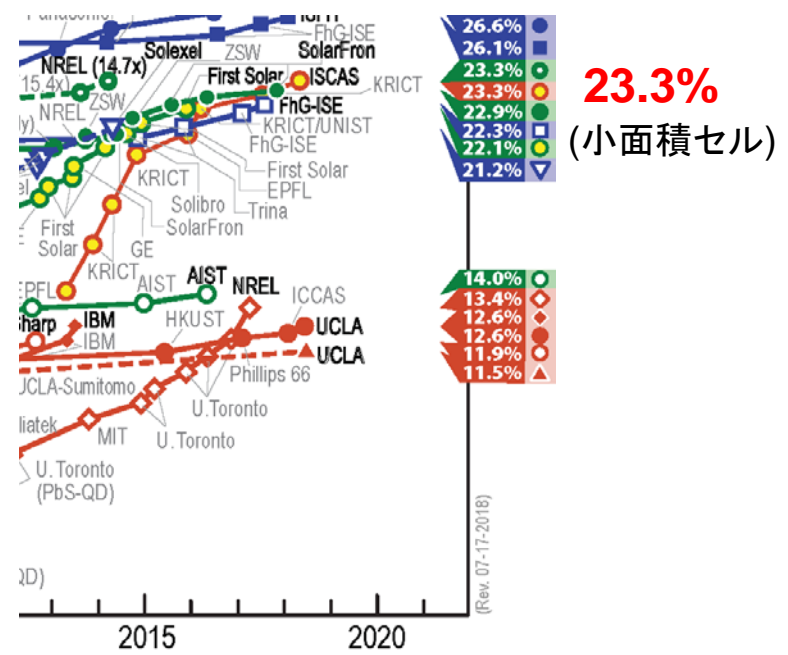
- 剥離部分での発電はない
- スクライブ箇所にもわずかに値がある
→ LBIC照射レーザー光の散乱(または、隣接セルエッジからの反射)により、発電領域に入射 (0.03%程度)

上田他: 成果報告会ポスター No. 81

ペロブスカイト太陽電池の変換効率(最近のトップデータ)

NREL chart (Rev.07-17-2018)

● Perovskite



NREL Webサイトより
<https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf>

Efficiency Tables v52 (Prog. Photovolt.)

赤字: v52における新報告値

	変換効率(%)	面積 (cm ²)
Cell (小面積)	22.7	0.0935 (ap)
Cell (~1 cm ²)	20.9	0.991 (da)
minimodule	17.25	277 (da)
submodule	11.7	703 (da)
module	11.6	802 (da)
PSC/Si (monolithic)	25.2	1.419 (da) 1.088 (da)
PSC/CIGS	22.4	0.042 (da)

データ引用:
 M. A. Green *et al.*, Prog. Photovolt. Res. Appl. **26**, 427–436 (2018).

- ◆ セル単体の高効率化
- ◆ モジュール化・大面積化
- ◆ 多接合(スタック)、c-Si, CIGSとの組合せ

ペロブスカイト太陽電池の変換効率測定

➡ “(Quasi-) steady-state” における性能を評価指標とする方向に

“(Quasi-) steady-state”性能は
どのように測定・評価する？

- **Asymptotic法**
(又は、Dynamic I-V法とも)
- **V_{pm} ホールド法**
バイアス電圧を V_{pm} に保持し、
 $P_{max}(I_{pm})$ 測定
- **最大電力点追従制御**
(Maximum-Power-Point
Tracking; **MPPT**)

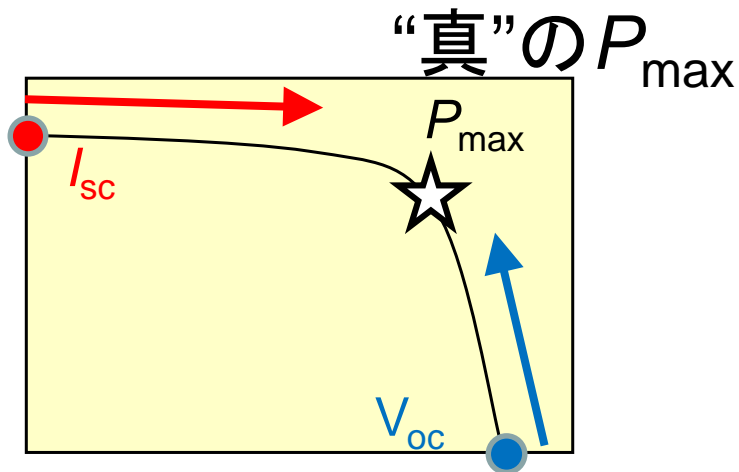
Asymptotic法

- 電圧点をステップで変化
- 各電圧点で、安定化後の電流を測定
→ 各点をつなげてI-V特性

配布版では図略

E. L. Unger *et al.*, Energy Environ. Sci., 7, 3690 (2014),
Figure 6.

V_{pm} ホールド法による高精度 I - V 測定



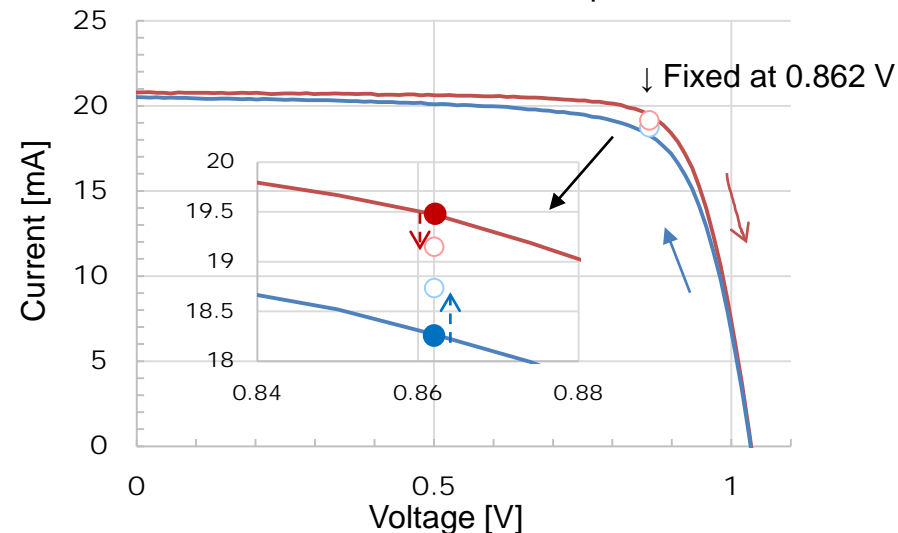
- Step1: I - V 測定掃引条件最適化
→ I - V 測定(両方向)
- Step2: V_{pm} ホールド測定
電圧を V_{pm} に固定し、電流の時間
変化測定
→ “真”の P_{max} を評価可能

測定再現性への課題:

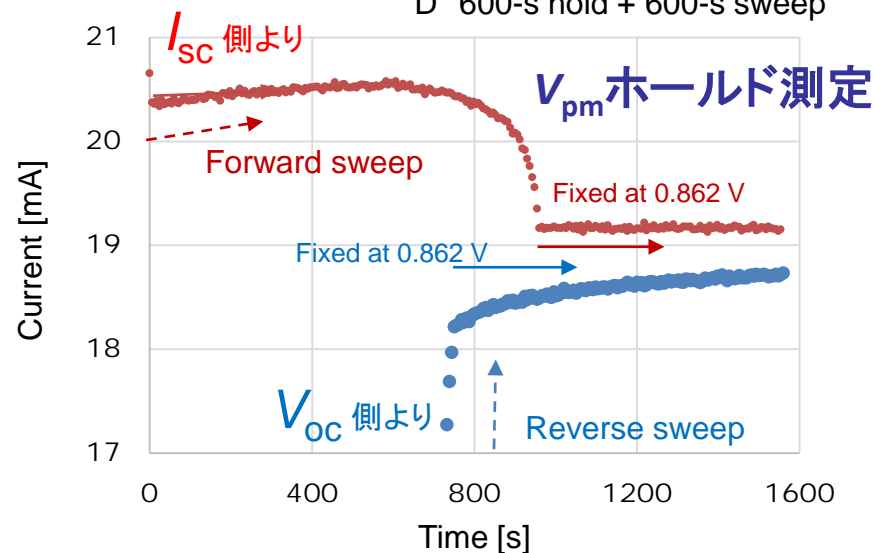
- 過渡応答、ヒステリシス
- 不安定性 (or 劣化)

測定結果 (一例)

D 600-s hold + 600-s sweep

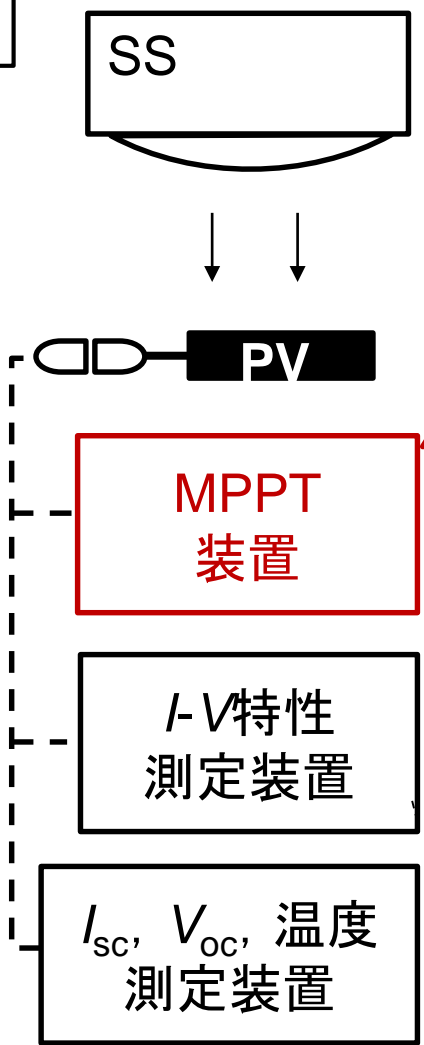


D 600-s hold + 600-s sweep



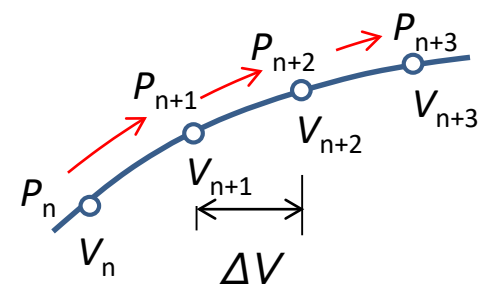
MPPT法による quasi-steady-state性能の評価

測定系構成

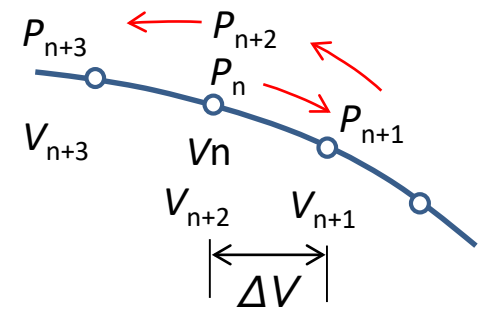


MPPT制御アルゴリズム (hill-climbing法)

$P_{n+1} \geq P_n$ の場合
 $V_{n+1} > V_n$ の時、 $V_{n+2} = V_{n+1} + \Delta V$
 $V_{n+1} < V_n$ の時、 $V_{n+2} = V_{n+1} - \Delta V$

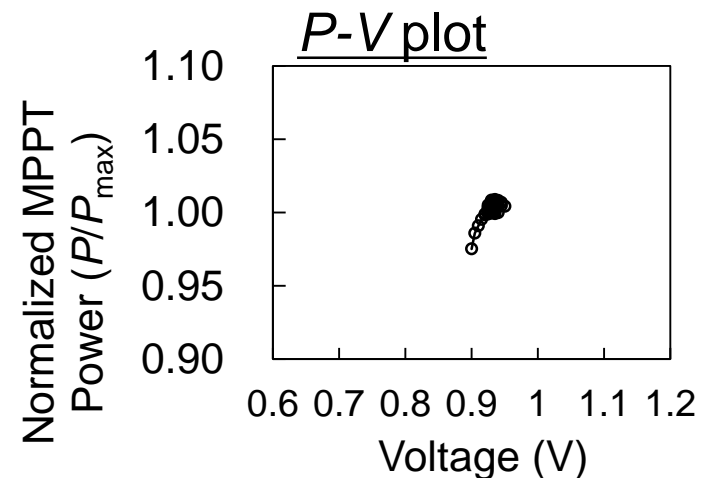
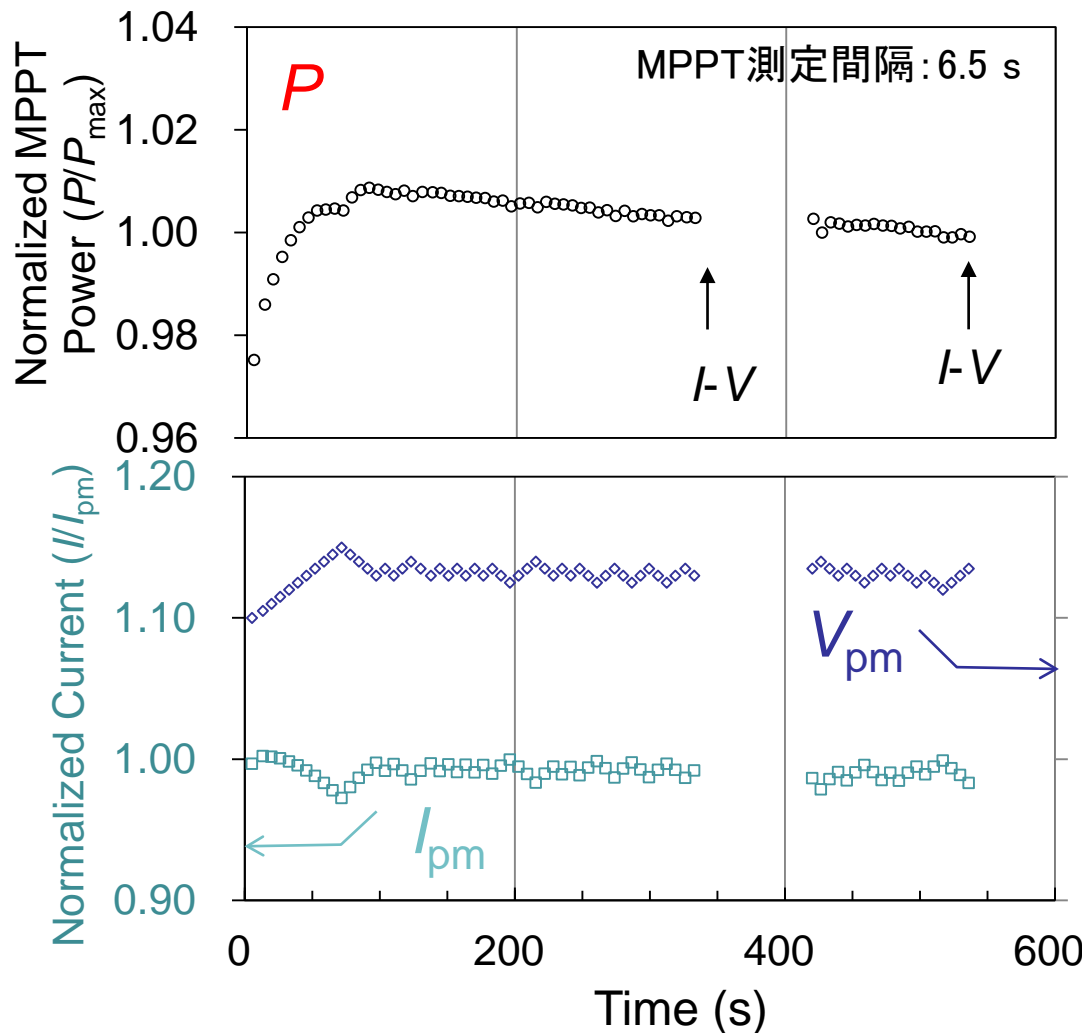


$P_{n+1} < P_n$ の場合
 $V_{n+1} > V_n$ の時、 $V_{n+2} = V_{n+1} - \Delta V$
 $V_{n+1} < V_n$ の時、 $V_{n+2} = V_{n+1} + \Delta V$



MPPT測定によるペロブスカイト太陽電池性能評価

i) MPPT制御パラメータ設定が適切時

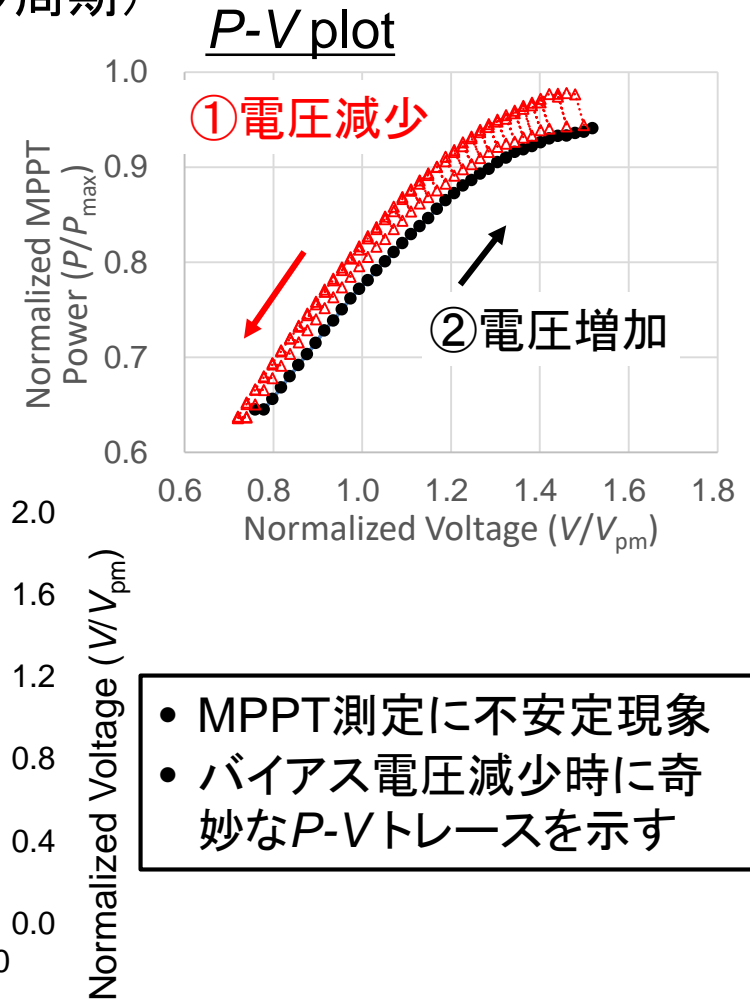
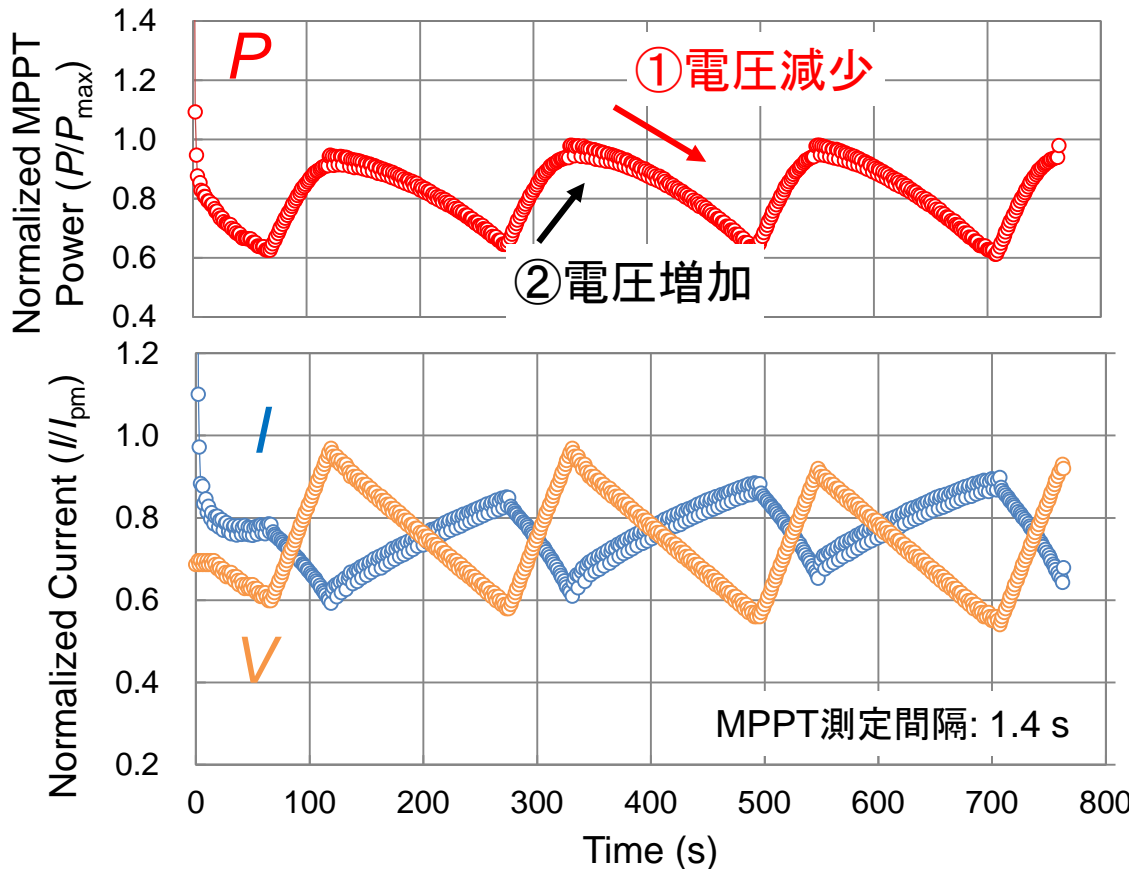


V_{pm} が定常値付近3~4点
 以内で変動。
 ⇒ MPPT制御が良好。

MPPT測定によるペロブスカイト太陽電池性能評価

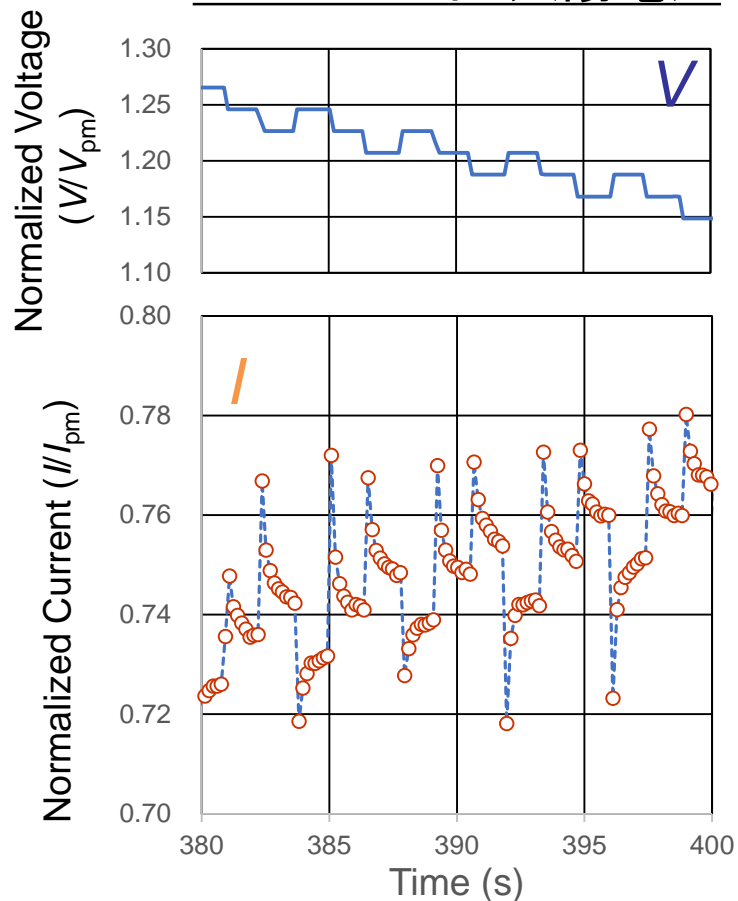
ii) MPPT制御パラメータ設定が不適切時

- 制御中の電力値 (P) が振動 (数十秒～数百秒周期)
- 電流・電圧がノコギリ状波形を繰り返す

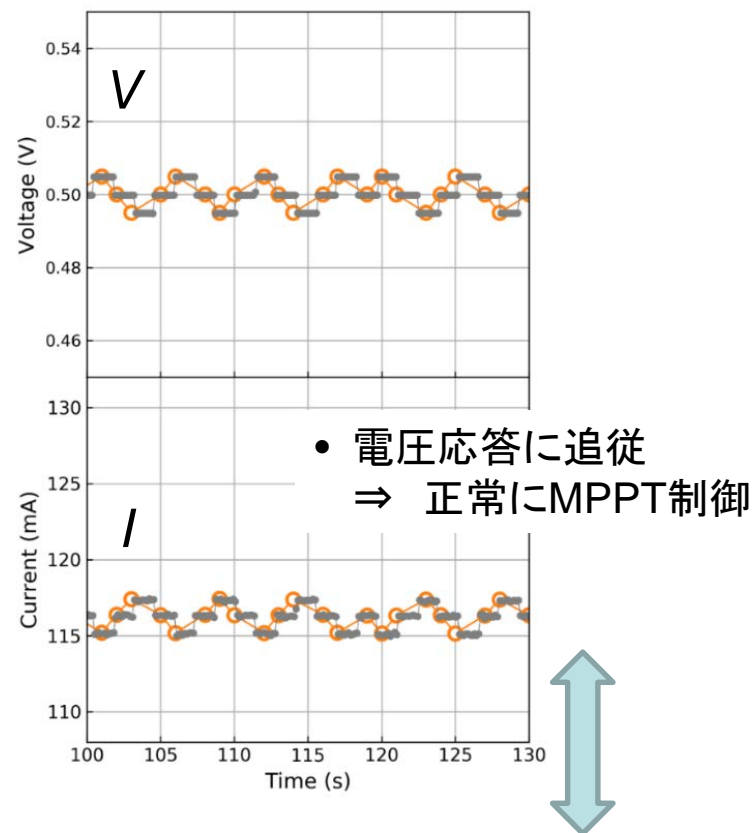


MPPT制御中の電流応答波形

ペロブスカイト太陽電池



比較:c-Si太陽電池(速い電気応答)



- MPPT制御時、バイアス電圧のステップ変化に対して、電流が過渡応答(アンダー/オーバーシュート)を示している。
- 電流過渡応答振幅が大きく、かつ、応答時間が長い(ここでは、秒オーダー)

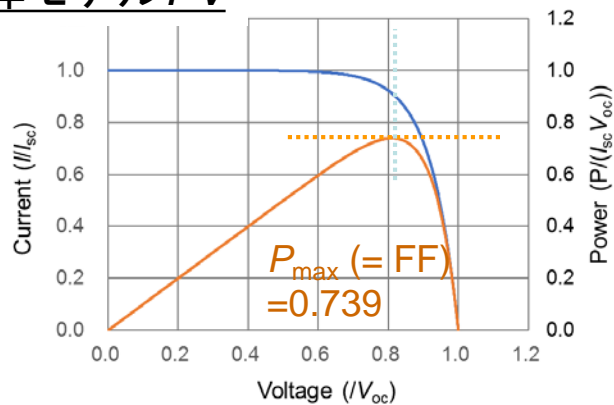
MPPT応答モデル計算 …… 電流過渡応答の影響を検討

計算モデル:

デバイス過渡応答: 電圧変化時に電流が指数関数的過渡応答(仮定)

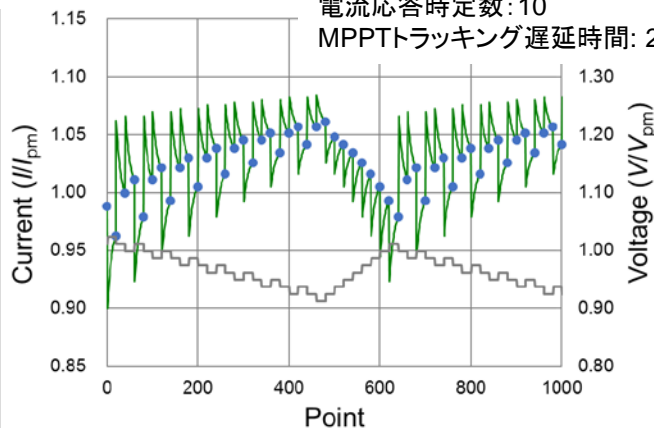
⇒ MPPTトラッキング遅延時間を変えて、MPPT制御出力波形を比較

計算モデルI-V

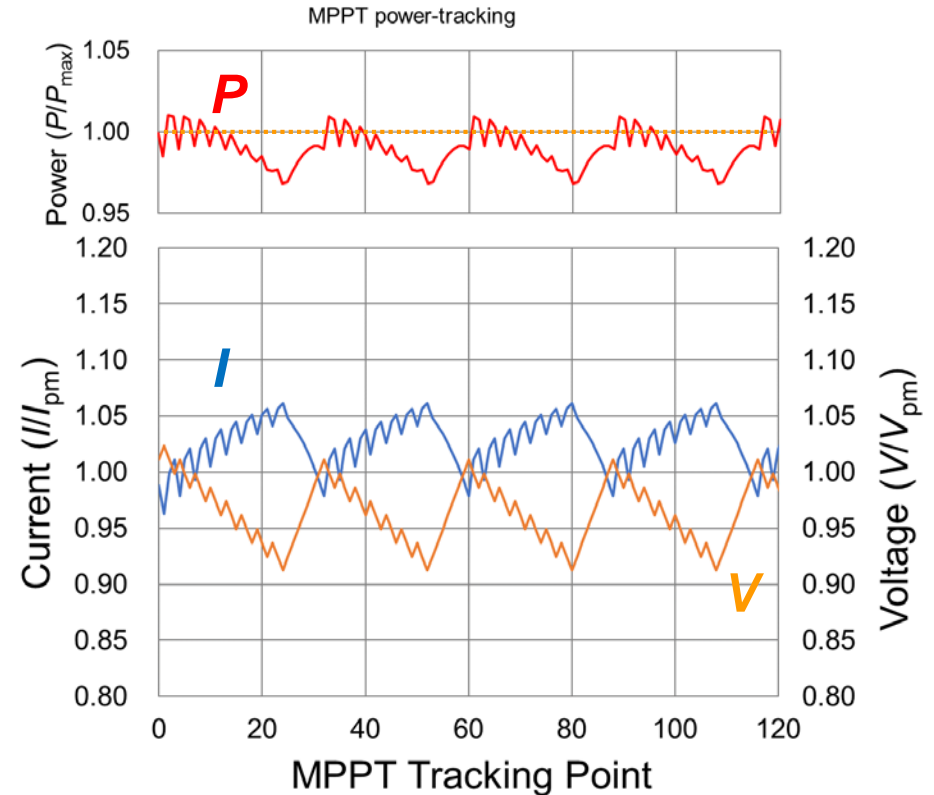


電流時間応答

時間応答パラメータ(無次元に規格化)
電流応答時定数: 10
MPPTトラッキング遅延時間: 20

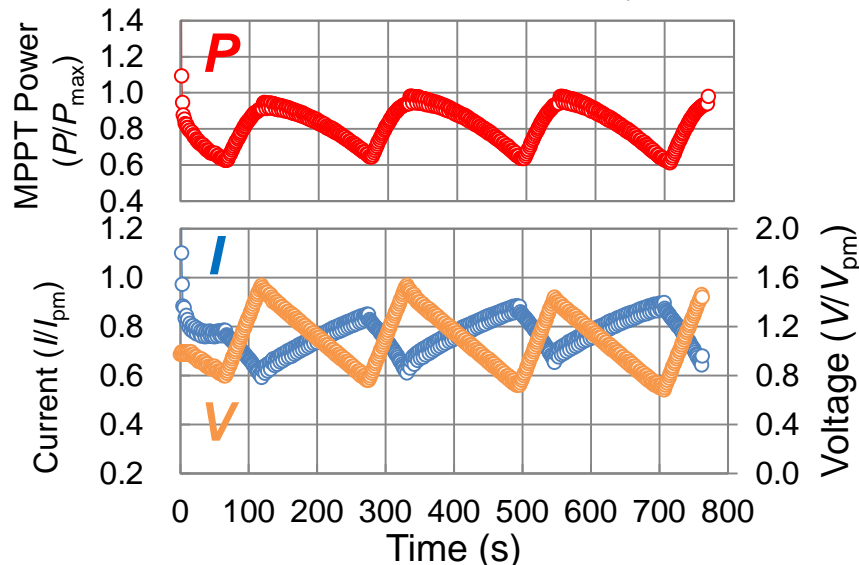
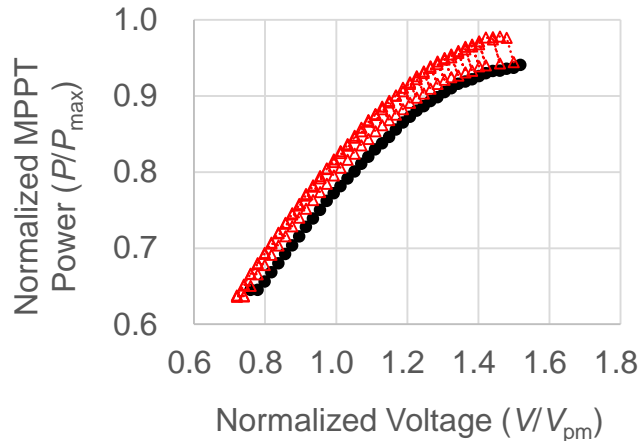


MPPTシミュレーション結果

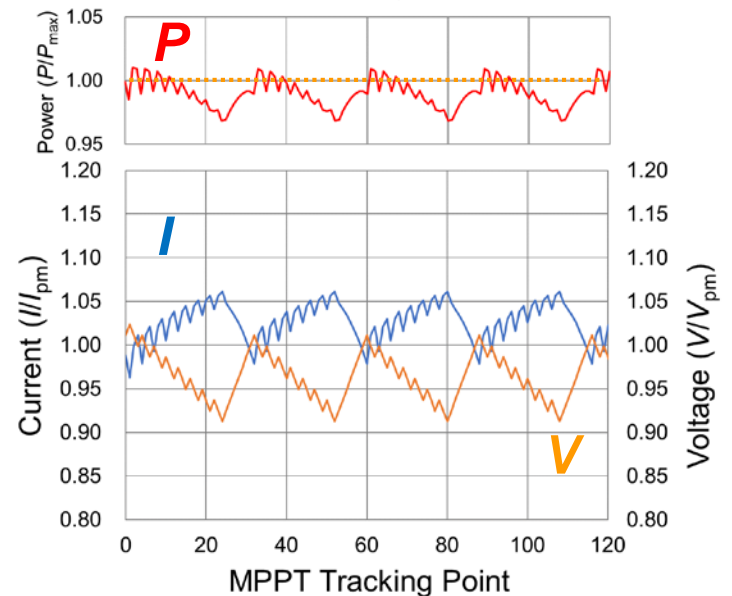
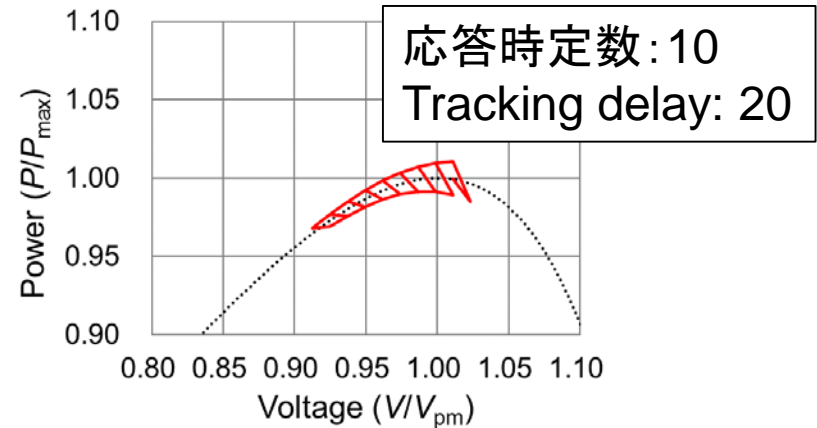


実験結果と計算結果との比較

実験結果



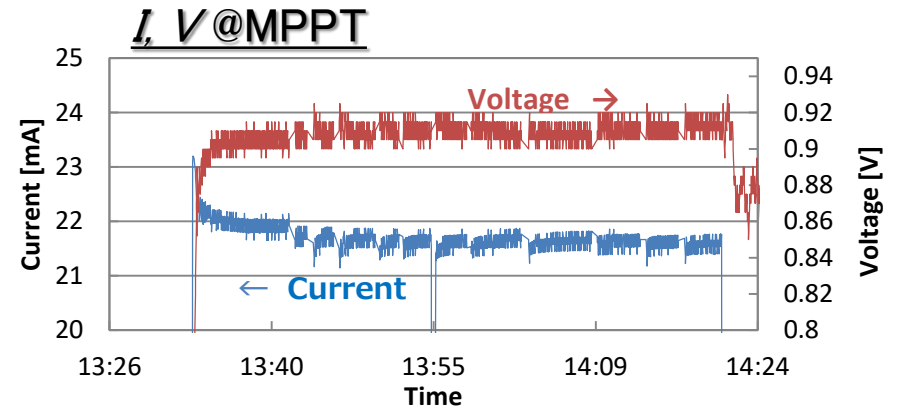
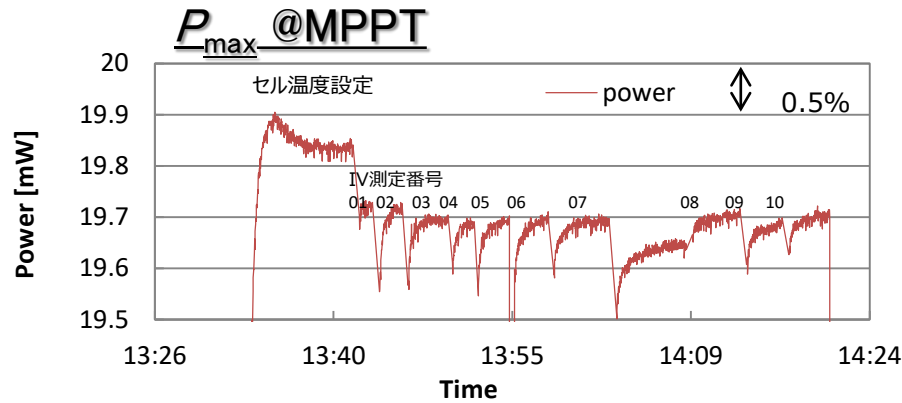
MPPT シミュレーション結果



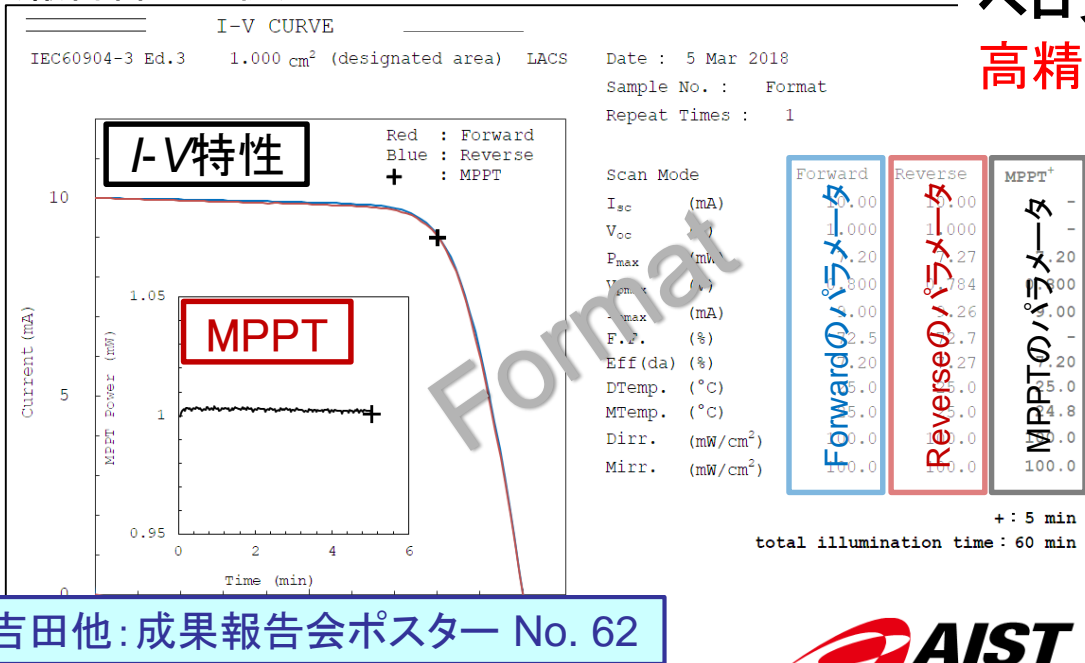
定性的ではあるが実験結果を良く再現

→ ペロブスカイト太陽電池の電気応答時間がMPPT不安定動作に影響

ペロブスカイト太陽電池：高精度I-V測定とMPPT測定(結果一例)



(報告書の一例)



ペロブスカイト性能評価結果報告 高精度I-V測定とMPPT測定の併用

測定法の提案

- 電圧固定またはMPPT測定による安定性検証 (> 5分)
- 両方向I-V特性測定

各種ペロブスカイト試料にて適用性検証(継続中)

⇒今後に向けて

- MPPT制御パラメータの最適化
- ペロブスカイト測定法の確立

吉田他: 成果報告会ポスター No. 62

本発表のまとめ

- 各種新型太陽電池(セル・モジュール)の高精度性能評価技術の開発状況を報告
 - ・ペロブスカイト太陽電池
 - ・高効率結晶Si太陽電池(セル・モジュール)
 - ・その他の高精度測定に向けた技術開発
 - 基準セル反射の影響 / - LBIC測定による有効発電領域評価
- ペロブスカイト太陽電池の高精度性能評価
 - ・(Quasi-) steady-stateにおける性能評価が必要に.
 - ・MPPT制御を導入し、それを用いた性能評価を実施.
- ペロブスカイト太陽電池MPPT制御
 - ・デバイス電気応答を考慮したパラメータ設定が必要.

今後の課題:

- ・MPPT制御パラメータ設定の最適化 ← 各種試料での検証.
- ・性能評価法を手順化し、主要研究・試験機関に提案、展開及び標準化.

本講演に関する口頭・ポスター発表

口頭発表(+ポスター発表)

菱川 「屋外高精度性能評価技術 ～新STC補正法の開発～」

ポスター発表

● 太陽電池性能評価技術の開発(新型太陽電池、屋外高精度測定)

大島 「結晶シリコン太陽電池I-V特性の新温度補正式」

吉田 「ペロブスカイト太陽電池性能評価技術の開発」

上田 「高精度太陽電池セル測定のための基準セルの反射の影響の評価」

志村 「c-Siセル性能評価においてプローブ影が I_{sc} に与える影響およびその見積方法」

菱川 「屋外高精度性能評価技術 ～istring I/V特性測定への応用～」

● 基準太陽電池の校正技術の開発

猪狩 「一次基準太陽電池校正の高度化」

高瀬 「測光標準としての超高温定点黒体炉利用技術」

渡邊 「積分球光源法の高度化による分光放射計用各種ディテクタの応答直線性評価」

小久保 「複数光源切り替えによる分光放射計の非直線応答性の評価」

謝辞

評価・標準チーム:

【太陽電池性能評価】

菱川善博、土井卓也、志村陽哉、佐々木あゆ美、上田孝、山越憲吾、
大島博典、杉本和則、比嘉道也、武内貴和

【基準太陽電池の校正技術開発】

猪狩真一、渡邊良一、高瀬滝男、岡村清和、周泓、小久保順一、薛雁群、
武田俊輔

NEDO受託研究プロジェクト:

宮崎大学 西岡賢祐先生、立命館大学 峯元高志先生、岐阜大学 小林智尚先生、
東京理科大学 植田譲先生、電気安全環境研究所(JET) 増田幸治氏

- 本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の受託研究として実施したものであり、関係各位に感謝いたします。
- 研究を実施するに際し、各種新型太陽電池試料をご提供頂いた大学、研究・試験機関、太陽電池関連企業様には感謝いたします。